XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/23

Análise Geotécnica e Soluções de Estabilização para Talude com Ruptura Circular na Rua Aristides Bertuol, Bento Gonçalves/RS

Lucas Rafael Norenberg Barbosa
Me. Geólogo, Arcgeo Geologia e Meio Ambiente, Osório, Brasil, lucasnorenberg@hotmail.com

Adriely Scheffer Arboite
Geóloga, Arcgeo Geologia e Meio Ambiente, Osório, Brasil, contato@arcgeogeologia.com.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a investigação geotécnica, a modelagem por equilíbrio limite e o projeto de estabilização de um talude urbano que sofreu ruptura rotacional durante obras de retaludamento em Bento Gonçalves/RS. O maciço é composto por solo coluvionar argiloso e horizonte saprolítico sobre rocha vulcânica alterada/fraturada. A investigação incluiu levantamento topográfico, mapeamento geológico-geotécnico, sondagem, ensaios de cisalhamento direto e modelagem no software SLIDE2. Os parâmetros médios obtidos para o solo coluvionar foram c = 28,3 kPa, φ = 18,2° e γ = 14 kN/m³. Na condição natural, as análises indicaram fatores de segurança entre 2,4 e 3,6. Na condição sem coesão, a busca automática gerou superfícies rasas e localizadas, com baixos fatores de segurança, as quais foram interpretadas como mecanismos superficiais de instabilização e não como a ruptura global observada em campo. A avaliação do mecanismo global foi vinculada à superfície de ruptura real interpretada a partir da cicatriz mapeada e do perfil geológico-geotécnico. A solução proposta combina muros de gabião na zona rompida, retaludamento, estruturas de contenção e drenagem nos setores adjacentes, reduzindo a influência das pressões neutras e aumentando a segurança global do talude.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Ruptura Rotacional, Saturação, Muros de Gabião, Equilíbrio Limite.

ABSTRACT: This paper presents the geotechnical investigation, limit equilibrium modeling, and stabilization design of an urban slope that experienced a rotational failure during regrading works in Bento Gonçalves, southern Brazil. The slope mass consists of clayey colluvial soil and a saprolitic horizon overlying weathered and fractured volcanic rock. The investigation comprised topographic survey, geological-geotechnical mapping, drilling, direct shear tests, and stability modeling using SLIDE2 software. Average shear strength parameters obtained for the colluvial soil were c' = 28.3 kPa, φ' = 18.2°, and γ = 14 kN/m³. Under natural conditions, the stability analyses yielded safety factors between 2.4 and 3.6. Under the no-cohesion condition, the automatic search generated shallow and localized slip surfaces with low safety factors, which were interpreted as superficial instability mechanisms rather than as the global failure observed in the field. The assessment of the global mechanism was related to the real failure surface interpreted from the mapped scarp and the geological-geotechnical profile. The proposed stabilization combines gabion retaining walls in the failed zone, regrading, retaining structures, and drainage measures in adjacent sectors, reducing pore pressure effects and increasing overall slope safety.

KEYWORDS: Slope Stability, Rotational Failure, Limit Equilibrium Method, Gabion Retaining Walls, Drainage.

1. INTRODUÇÃO

Taludes urbanos implantados em terrenos constituídos por solos residuais e coluvionares sobre maciços vulcânicos apresentam comportamento geotécnico fortemente dependente das condições hidráulicas. A presença de estrutura residual, coesão aparente e anisotropia decorrente do intemperismo condiciona a estabilidade a variações relativamente pequenas de poropressão.

Durante obras de retaludamento na Rua Aristides Bertuol, em Bento Gonçalves/RS, ocorreu uma ruptura rotacional envolvendo solo coluvionar argiloso e saprólito subjacente. O evento ocorreu após período de elevada pluviosidade, sugerindo relação direta com a redução da resistência efetiva do material.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a caracterização geotécnica detalhada do talude, discutir os mecanismos envolvidos na ruptura, avaliar quantitativamente a estabilidade por meio de modelagem numérica e fundamentar tecnicamente as soluções de estabilização adotadas.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO E CONDIÇÕES DO TALUDE

O talude analisado apresenta altura variável entre 8 e 10 m na frente de corte principal (Figura 1), com trechos de elevada inclinação associados ao retaludamento e à geometria original da encosta (Figuras 2 e 3). A sequência geológico-geotécnica identificada compreende dois materiais principais para fins de modelagem: (i) solo coluvionar argiloso/saprólito muito alterado, mais sensível à variação de umidade e à perda de coesão aparente; e (ii) maciço vulcânico alterado e fraturado, constituído por rocha riolítica/basáltica, que atua como horizonte de base do modelo.

O material superficial apresenta estrutura parcialmente preservada, agregação e comportamento pseudo-coesivo, com matriz argilosa avermelhada e presença de blocos de rocha alterada. Entre a cobertura coluvionar e o maciço rochoso ocorre horizonte saprolítico muito alterado e fragmentado, com maior suscetibilidade à saturação e à redução da resistência ao cisalhamento (Figura 4).

A presença de fraturas sub-horizontais e subverticais no maciço vulcânico contribui para a infiltração, redistribuição de fluxos internos e elevação localizada de pressões neutras. Essa condição hidrogeotécnica é compatível com os pontos de surgência observados em campo e com a mobilização de superfície de ruptura circular na porção central do talude.

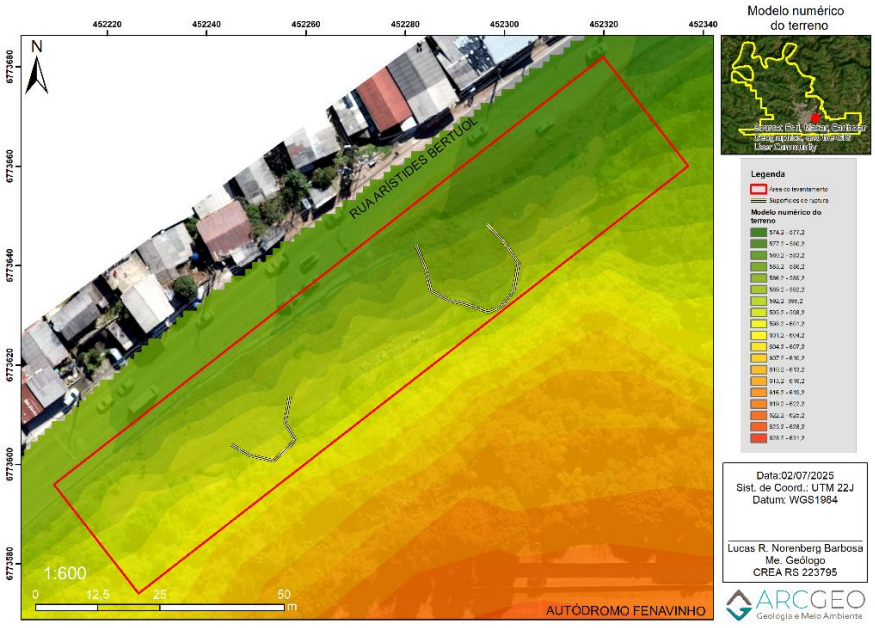


Figura 1. Modelo Numérico do Terreno.

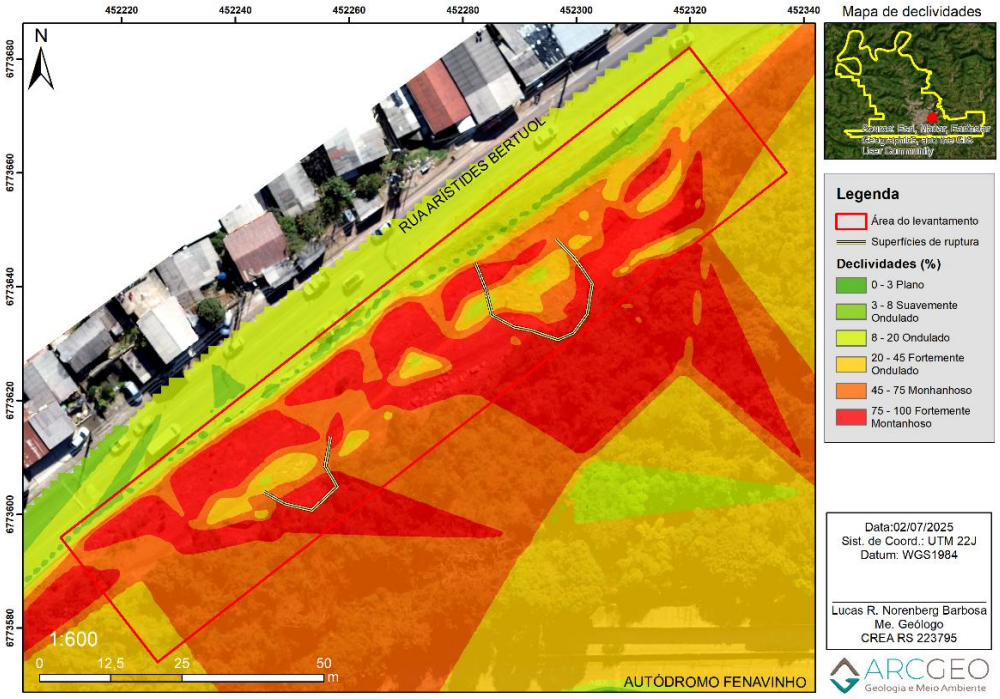


Figura 2. Mapa de Declividades do terreno.



Figura 3. Planta de Situação do talude.



Figura 4. Características geotécnicas observadas no talude.

3. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A investigação envolveu coleta de amostras indeformadas e execução de ensaios de cisalhamento direto sob condição drenada. Os resultados médios indicaram coesão de 28,3 kPa, ângulo de atrito de 18,2° e peso específico natural de 14 kN/m³ para o solo coluvionar argiloso. Esses parâmetros foram empregados na análise da condição natural e, na análise de sensibilidade, a coesão do solo coluvionar foi reduzida para c = 0 kPa.

A análise granulométrica, visual e de campo indica material predominantemente argiloso, com fração fina expressiva e comportamento dependente da parcela coesiva. Essa característica justifica o baixo ângulo de atrito obtido e a elevada sensibilidade do talude à saturação, especialmente no horizonte coluvionar/saprolítico.

A rocha vulcânica alterada/fraturada e o horizonte saprolítico foram representados separadamente do solo coluvionar no modelo de estabilidade. Para o material de base foram adotados parâmetros conservadores, compatíveis com o maciço observado em campo e em sondagem: $\gamma = 25$ kN/m³, $\varphi = 40°$ e $c \approx 50$ kPa. A Tabela 1 sintetiza os parâmetros adotados e a Figura 5 apresenta o perfil geológico-geotécnico interpretativo da seção da ruptura.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados na modelagem de estabilidade.

Material	Interpretação no modelo	γ (kN/m³)	c (kPa)	φ (°)
Solo coluvionar argiloso / saprólito alterado	Horizonte mobilizado pela ruptura e sensível à saturação	14	28,3 / 0*	18,2
Maciço vulcânico alterado/fraturado	Horizonte de base do modelo geotécnico	25	≈ 50	40

** Valor c = 0 kPa adotado apenas na análise de sensibilidade da condição sem coesão.*

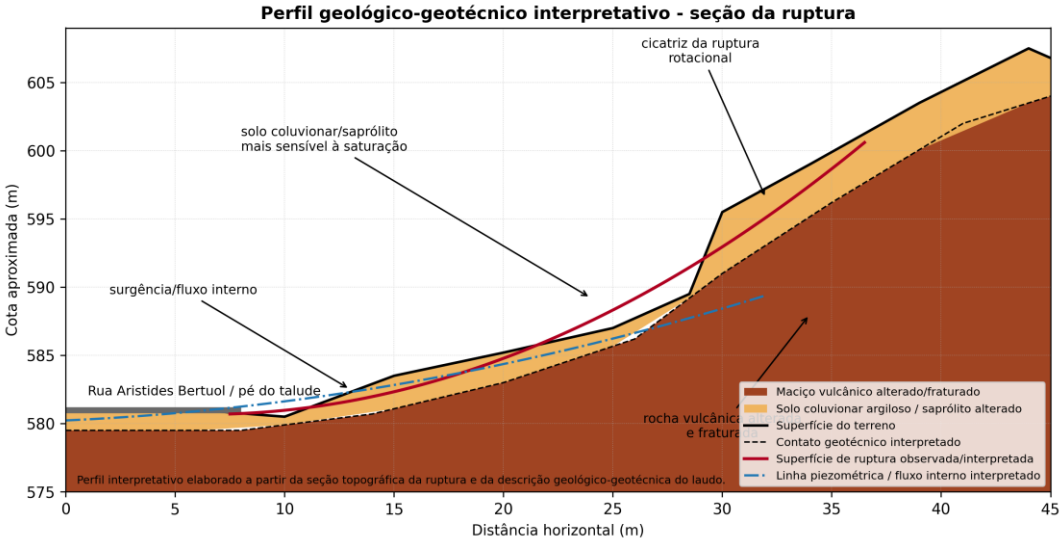


Figura 5. Perfil geológico-geotécnico interpretativo da seção da ruptura, com indicação dos dois materiais considerados na modelagem e da superfície de ruptura observada/interpretada.

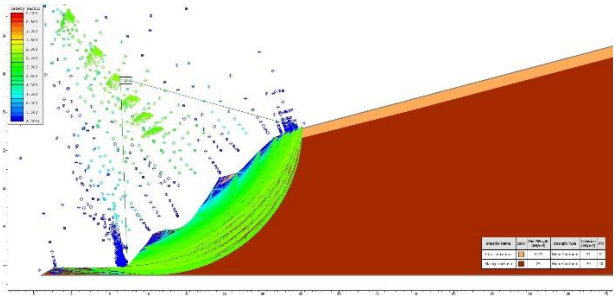
4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A modelagem foi realizada pelo método do equilíbrio limite, considerando três seções perpendiculares ao talude (Figura 6). Na condição natural, utilizando os parâmetros obtidos em laboratório para o solo coluvionar e os parâmetros conservadores do material de base, os fatores de segurança variaram entre 2,4 e 3,6, indicando estabilidade satisfatória para a geometria modelada sob condição parcialmente saturada. Em seguida, foi executada análise de sensibilidade com redução da coesão do solo coluvionar para c = 0 kPa, representando perda da parcela coesiva aparente associada à redução da sucção matricial e ao aumento do grau de saturação. Nessa condição, a busca automática identificou superfícies críticas rasas e localizadas na face do talude, com fatores de segurança muito baixos. Esses resultados foram reinterpretados como mecanismos superficiais de instabilização, e não como representação direta da ruptura global observada em campo. Para o mecanismo global, a interpretação foi vinculada à superfície de ruptura real, definida a partir da cicatriz mapeada, do pé do escorregamento e do perfil geológico-geotécnico da seção da ruptura (Figura 5). Assim, a análise distingue dois comportamentos: instabilidades rasas sob perda de coesão e o mecanismo rotacional global controlado pela geometria real da ruptura, pela interface colúvio/saprólito-rocha e pela elevação de pressões neutras.

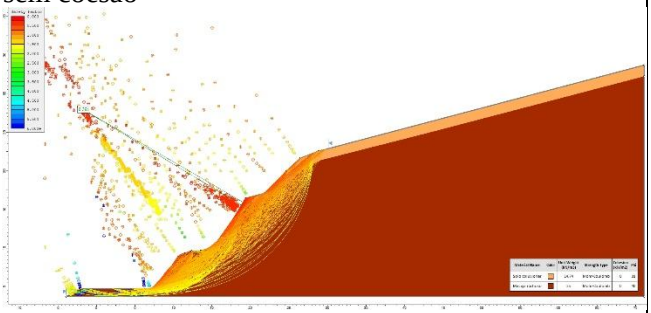


Figura 6. Localização das seções de análise perpendiculares ao talude.

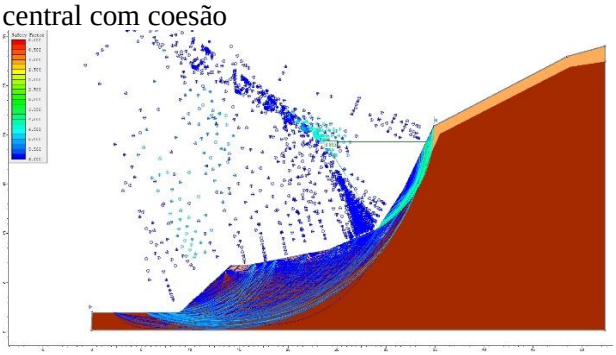
A) Modelagem de Fator de Segurança na Seção norte com coesão



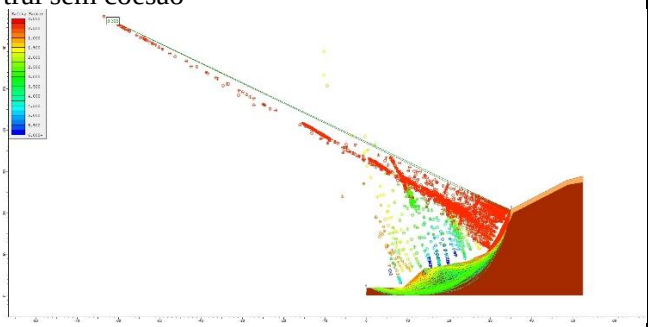
B) Modelagem de Fator de Segurança na Seção norte sem coesão



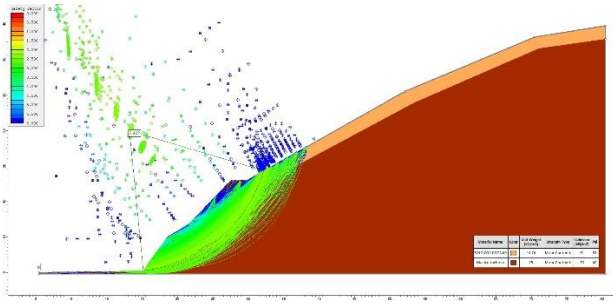
C) Modelagem de Fator de Segurança na Seção central com coesão



D) Modelagem de Fator de Segurança na Seção central sem coesão



E) Modelagem de Fator de Segurança na Seção sul com coesão



F) Modelagem de Fator de Segurança na Seção sul sem coesão

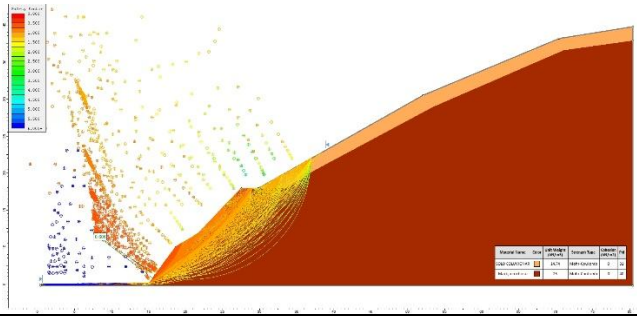


Figura 7. Modelagem com cálculo do Fator de Segurança em três seções perpendiculares ao talude. As superfícies sem coesão obtidas por busca automática representam mecanismos rasos/localizados na face do talude, devendo ser diferenciadas da superfície de ruptura global observada em campo.

5. INTERPRETAÇÃO MECÂNICA DA RUPTURA

A ruptura ocorreu no conjunto solo coluvionar/saprólito alterado apoiado sobre maciço vulcânico fraturado, cujo comportamento apresenta parcela de coesão aparente associada à sucção matricial, à cimentação residual e à estrutura herdada do intemperismo. Durante período de elevada pluviosidade, a infiltração promoveu a redução da sucção, aumento de poropressão, diminuição da tensão efetiva e a perda parcial da coesão estrutural.

O solo coluvionar e o saprólito apresentam comportamento típico de materiais estruturados, nos quais parte da resistência mobilizada decorre da sucção matricial. A infiltração intensa reduz a sucção, deslocando o estado do solo para condição próxima à saturação plena e reduzindo a coesão aparente. A análise sem coesão, quando realizada com busca automática, tende a selecionar superfícies rasas de menor resistência; por isso, esses baixos fatores de segurança devem ser interpretados como suscetibilidade a instabilidades superficiais. A ruptura global, por sua vez, deve ser analisada a partir da superfície real mapeada em campo e da continuidade do horizonte coluvionar/saprolítico.

6. PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO

A solução adotada considerou a natureza do mecanismo de ruptura e a necessidade de controle hidráulico. Na zona rompida, optou-se por contenção passiva em três níveis de muros de gabião, solução escolhida por sua capacidade drenante e adaptação à geometria irregular da escarpa. Nas porções norte e sul, ainda estáveis porém sensíveis à perda de resistência por saturação, foram propostas medidas complementares de retaludamento, contenção por estruturas de concreto/blocos e drenagem superficial e subsuperficial. Essas intervenções aumentam a resistência mobilizável, reduzem as forças solicitantes e diminuem a influência das pressões neutras, principal agente desestabilizador identificado na análise.

7. DISCUSSÃO

A análise demonstrou que taludes em solos coluvionares e saprolíticos estruturados podem apresentar FS elevados em condição natural, mas desenvolver mecanismos de instabilização sob aumento de saturação e redução de sucção.

A comparação entre cenários mostrou que os menores fatores de segurança na condição sem coesão estão associados, predominantemente, a superfícies rasas selecionadas automaticamente pelo algoritmo de busca. Embora esses resultados indiquem elevada suscetibilidade da face do talude, eles não devem ser tomados isoladamente como representação do mecanismo global de ruptura.

A interpretação mecânica mais representativa para o evento observado deve considerar a superfície global mapeada em campo, conectando a crista, a massa mobilizada e o pé da ruptura. A distinção entre solo coluvionar/saprólito e maciço vulcânico alterado/fraturado é fundamental, pois condiciona a profundidade potencial da superfície de ruptura e a forma de mobilização da resistência ao cisalhamento.

A solução combinada — contenção passiva na área rompida, reconfiguração geométrica, estruturas de contenção nos setores adjacentes e drenagem — atua simultaneamente no aumento da resistência, na redução das forças solicitantes e no controle das pressões neutras.

8. CONCLUSÕES

A ruptura foi governada pela combinação entre geometria desfavorável, infiltração e perda parcial da coesão aparente no horizonte coluvionar/saprolítico.

A estabilidade do talude é sensível à variação de saturação, sucção matricial e pressões neutras.

Os fatores de segurança muito baixos obtidos na condição sem coesão por busca automática representam mecanismos rasos/localizados, não devendo ser interpretados isoladamente como ruptura global.

A avaliação da ruptura global deve considerar a superfície real mapeada em campo, associada ao perfil geológico-geotécnico e à diferenciação entre os dois materiais modelados.

A modelagem confirmou a necessidade de distinguir instabilidades superficiais de mecanismos globais de ruptura para interpretação adequada dos resultados.

As soluções adotadas, combinando contenção, retaludamento e drenagem, reduzem a depen-dência da coesão aparente e restituem níveis adequados de segurança ao talude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3080/D3080M-11: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, 2011.

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, London, v. 5, n. 1, p. 7–17, 1955.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha Porto Alegre (SH.22). Brasília, 2006.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, 2008.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. Soil strength and slope stability. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

FELLENIUS, W. Calculation of the stability of earth dams. In: Proceedings of the 2nd Congress on Large Dams. Washington: International Commission on Large Dams, 1936. p. 445–462.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: John Wiley & Sons, 1993.

HAUSMAN, A. Província basáltica da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul: aspectos geológicos e geotécnicos. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

HOEK, E.; BRAY, J. W. Rock slope engineering. 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual técnico de geomorfologia. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

JANBU, N. Slope stability computations. In: HIRSCHFELD, R. C.; POULOS, S. J. (ed.). Embankment-dam engineering. New York: John Wiley & Sons, 1973. p. 47–86.

MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, London, v. 15, n. 1, p. 79–93, 1965.

RAMGRAB, G. E.; WILDNER, W.; LOPES, R. C. Carta geológica do Rio Grande do Sul ao milionésimo. Porto Alegre: CPRM, 2004.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil mechanics in engineering practice. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

WILDNER, W.; LOPES, R. C. A Formação Serra Geral no Rio Grande do Sul: aspectos estratigráficos e estruturais. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 374–379, 2000.